

Resum

Les simulacions computacionals són un dels mètodes de treball més usats en l'actualitat dins el camp de l'enginyeria. En l'enginyeria nuclear en particular, es fan servir les simulacions termohidràuliques mitjançant diferents codis de càlcul. Els codis termohidràulics s'usen en el camp de la seguretat nuclear des de fa molts anys i el Grup d'Estudis Termohidràulics (GETH) del Departament d'Enginyeria Nuclear de la UPC té àmplia experiència realitzant estudis tant per a la indústria com per a organismes independents del camp de la seguretat nuclear.

Dels diferents codis termohidràulics desenvolupats per la Nuclear Regulatory Commission, destaca el codi TRACE que és la conjunció dels diferents codis anteriors en un de sol. El GETH té molta experiència amb el codi RELAP, però en canvi no ha fet servir el codi TRACE amb anterioritat.

Adicionalment, cal afegir que l'ús dels codis termohidràulics consistia fins ara a crear un fitxer de text que s'executava més tard. La creació d'aquest fitxer de text no era gens senzilla fins a l'arribada del programa SNAP. Aquest és un programa gràfic que permet crear els models a ser simulats.

Aquest projecte es divideix en dues parts. En la primera part es detalla el procés d'implementació del codi TRACE i el programa SNAP com a software associat, els quals no s'havien fet servir amb anterioritat al GETH. Aquesta part ha comportat l'elaboració d'un manual d'usuari per a ús del GETH. La segona part conté un cas pràctic d'ús del codi TRACE. Aquest cas pràctic està publicat i disponible a través de la web de la NRC. Cal incidir que la feina d'anàlisi i implementació d'aquest PFC es va realitzar l'any 2009 tot i que la seva presentació té lloc l'any 2016.





Sumari

MEMÒRIA

RESUM	1
SUMARI	3
1. GLOSSARI	5
2. PREFACI	7
2.1. Origen del projecte	7
2.2. Motivació	7
3. INTRODUCCIÓ.	9
3.1. Objectius del projecte.	9
3.2. Abast del projecte.	9
4. DESCRIPCIÓ DE LES EINES USADES.	11
4.1. Descripció del codi de càlcul RELAP5/MOD3.3.	11
4.1.1. Introducció.....	11
4.1.2. Característiques del codi RELAP5/MOD3.3.....	12
4.2. Descripció del codi de càlcul TRACE.....	12
4.2.1. Introducció.....	12
4.2.2. Característiques del codi TRACE	13
4.3. Descripció del programa SNAP.	14
4.3.1. Introducció.....	14
4.3.2. Característiques del programa SNAP.....	15
4.4. El servidor remot de SNAP	16
5. IMPLEMENTACIÓ DE LES EINES COMPUTACIONALS AL LABORATORI DE TERMOHIDRÀULICA.	17
5.1. Resum del procés de implementació	17
5.2. Qualificació del software.....	17
5.2.1. Avantatges i inconvenients.....	18
5.2.2. Dificultats trobades durant la implementació i qualificació del software.	19
5.3. Recomanacions de treball.	20
6. CAS PRÀCTIC.	21
6.1. Descripció del cas.....	21
6.1.1. Modelització.	21
6.1.2. Descripció del transitori.	24



6.2. Resultats obtinguts.	24
6.3. Desenvolupaments posteriors.....	31
7. PRESSUPOST	33
8. ESTUDI D'IMPACTE AMBIENTAL	35
CONCLUSIONS	37
ANNEX 1: NUREG IA-0243	39
ANNEX 2: MANUAL D'USUARI	41
AGRAÏMENTS	43
BIBLIOGRAFIA	45



1. Glossari

- **CN:** Central nuclear.
- **CSN:** Consejo de Seguridad Nuclear. Organisme independent espanyol encarregat de vetllar per la seguretat nuclear, equivalent a la NRC nord-americana.
- **DOE:** *Department of Energy*. Departament d'Energia dels Estats Units.
- **GETH:** Grup d'Estudis Termohidràulics.
- **GUI:** *Graphical User Interface*. Interfície gràfica d'usuari.
- **GV:** Generador de vapor.
- **Input:** Fitxer d'entrada de dades.
- **IRUG:** *International Relap Users Group*. Organisme dependent del departament d'Energia dels Estats Units (DOE), creador del codi RELAP5/3D.
- **LOCA:** *Loss of coolant accident*. Accident amb pèrdua de refrigerant.
- **NRC:** *Nuclear Regulatory Commission*. Organisme independent dels EEUU encarregat de la seguretat nuclear, el seu equivalent a l'estat espanyol és el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN).
- **Output:** Fitxer de sortida de dades.
- **PARCS:** *Purdue Advanced Reactor Core Simulator*. Codi de càlcul que s'encarrega de calcular la vessant neutrònica.
- **RCP:** *Main reactor coolant pump*. Bombes de refrigeració del reactor.
- **SCDAP:** Part del codi de RELAP5 encarregada de calcular l'evolució de la temperatura i els danys al nucli i les estructures del seu entorn. Aquests models descriuen l'escalfament, la deformació, l'oxidació i la fusió de les barres de combustible i control, així com d'altres estructures del vas del reactor.
- **SCRAM:** *Safety Control Rod Axe Man*. Parada ràpida del reactor inserint totes les barres de control dins del reactor per tal d'evitar o minimitzar les conseqüències d'una condició considerada perillosa.



- **SNAP:** *Symbolic Nuclear Analysis Package*. Interfície gràfica d'usuari per a l'ús dels codis termohidràulics.
- **TMI-2:** *Three Mile Island 2*. Central nuclear del tipus PWR situat a Harrisburg (Pennsylvania), EEUU, que va patir un accident l'any 1979. D'ençà (i juntament amb Txernobil) s'ha creat una imatge negativa vers l'opinió pública de l'energia nuclear.
- **TRACE:** *TRAC/RELAP Advanced Computational Engine*. Denominació actual del codi termohidràulic consolidat. Aquest PFC va fer servir les versions v4.160 i v5.0RC3.



2. Prefaci

2.1. Origen del projecte

L'accident de Three Mile Island (TMI-2) va marcar un abans i un després en el camp de la seguretat nuclear. Una de les conseqüències fou que l'ús de codis termohidràulics de càlcul es generalitzà arran de l'accident de TMI-2 com a una eina per a l'anàlisi de la seguretat nuclear.

Molts d'aquests codis foren desenvolupats per la NRC. Exemples d'aquests codis són: RELAP5, TRAC-PF1, TRAC-BF1 o RAMONA. Cada codi té les seves característiques pròpies que els fan més o menys adequats per a l'estudi de casos concrets, no obstant moltes de les seves capacitats se solapen però en canvi la seva programació és molt diferent. Per aquest motiu es va decidir de consolidar tots els diferents codis en un únic programa: el codi termohidràulic consolidat; a més d'incorporar millores en el càlcul numèric i en la programació. Enlloc de crear un codi nou des de zero es va decidir fer evolucionar un dels codis existents i el triat fou el TRAC-PF1. De l'evolució d'aquest codi s'ha arribat a l'actual codi TRACE, acrònim de *TRAC/RELAP Computational Engine* i que en les dates de la realització d'aquest PFC (any 2009) es troba en la versió 5.0RC3. Al mateix temps, en paral·lel al creixent ús del software de simulació numèrica com Ansys o COMSOL s'ha desenvolupat el programa SNAP. Aquest és una interfície gràfica amb la funcions de pre i post processador de les simulacions en TRACE, i a més té la peculiaritat que funciona en entorns de treball multi sistema ja sigui Windows o Linux.

Per altre banda, el Grup d'Estudis Termohidràulics (GETH) s'encarrega de l'elaboració i millora continua d'una biblioteca de casos, a partir de diferents models que s'actualitzen constantment, realitzats amb el codi de càlcul RELAP5 de les CN d'Ascó i Vandellòs. Arran de la introducció del codi TRACE, es vol realitzar estudis en aquest codi per a seguir sent referents en el camp de la seguretat nuclear. En un futur proper s'haurà de desenvolupar un model en TRACE de dites centrals nuclears.

2.2. Motivació

Aquest projecte suposa d'entrada l'ús del codi de càlcul TRACE, i també del programa SNAP, no usats anteriorment al GETH. També comporta la possibilitat d'utilitzar el codi de càlcul RELAP5, amb molta experiència d'ús.

Una de les diferències entre aquests dos codis de càlcul es troba en el fet que el codi TRACE porta incorporat a model tridimensional del vas del reactor (a partir d'ara, reactor a seques), mentre que en RELAP5 aquest és unidimensional. El GETH ha treballat amb models tridimensionals de reactor però no pas amb el codi TRACE. Per això s'amplia el coneixement



que es té d'aquesta nova versió tridimensional, utilitzant elements i possibilitats que no s'han utilitzat fins ara per la creació d'un nou model de reactor.

Per altra banda implica l'ús del sistema operatiu Linux, sistema operatiu cada cop més usat tant a nivell professional com també a nivell d'usuari. L'ús d'aquest entorn de treball suposa allunyar-se de l'omnipresent Windows.

L'experiència adquirida amb aquest projecte, servirà com a base i precedent per futurs treballs que permeten utilitzar millor les prestacions multidimensionals d'aquesta versió 3D del codi. El manual d'usuari de TRACE desenvolupat com a una part d'aquest PFC servirà pels futurs usuaris.

.



3. Introducció

3.1. Objectius del projecte

L'objectiu del present projecte fou la consolidació del codi TRACE com a eina d'anàlisi. Això comporta familiaritzar-se amb el seu ús i implementar-lo en els diferents ordinadors del laboratori de Termohidràulica. Un objectiu derivat fou testejar les possibilitats de pre i post processador del programa SNAP.

Com a prova de la viabilitat de l'ús tant del codi TRACE com del programa SNAP s'ha elaborat un cas pràctic consistent amb un model en el codi termohidràulic consolidat.

3.2. Abast del projecte

Aquest projecte és el punt de partida de l'ús tant del codi TRACE com del programa SNAP com a eines d'anàlisi termohidràulica. El projecte es pot dividir en dos etapes:

- La 1a etapa és la familiarització i implementació del software usat: TRACE i SNAP. Es parteix de l'experiència adquirida en RELAP. Aquesta etapa comporta l'elaboració d'una guia d'instal·lació del software.
- La 2a etapa és la qualificació del software SNAP.
- La 3a etapa és la culminació del projecte i consisteix en cas pràctic de modelització i simulació d'un cas en TRACE. Aquesta fase ha donat lloc a un treball publicat per la NRC.

El manual d'usuari derivat d'aquest projecte s'ha fet servir en el cas pràctic que tanca el projecte. I també s'ha usat en projectes posteriors.

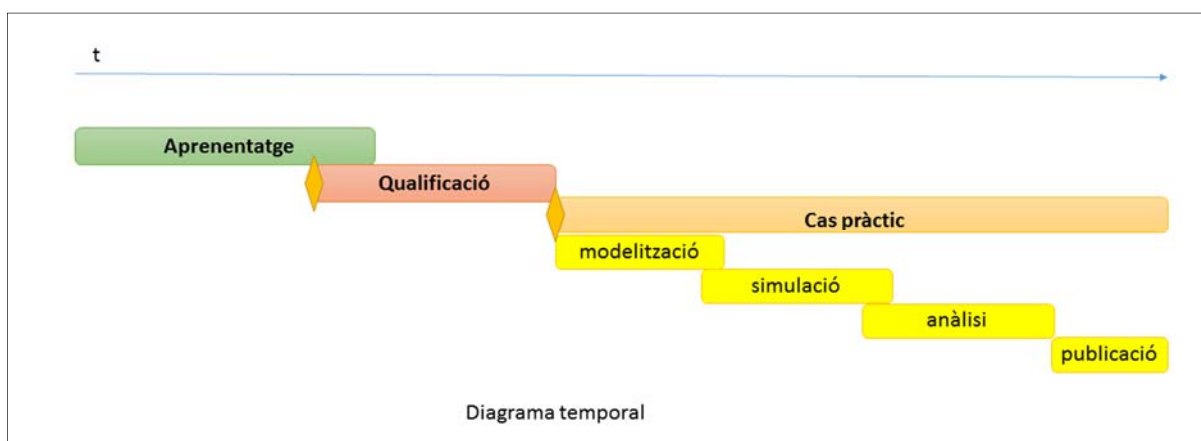


Fig. 3.1 Diagrama temporal de les diferents fases d'aquest projecte



4. Descripció de les eines usades

Una part important d'aquest PFC ha estat el referit al software. Tot seguit es descriu el programari usat. Aquest està format pels codis de càlcul RELAP5 i TRACE i el programa SNAP. Tot el software usat ha estat desenvolupat sota els auspicis de la NRC i la seva llicència és gratuïta per a la comunitat d'usuaris.

Com a part d'aquest PFC s'ha creat un manual d'usuari de TRACE. Aquest manual d'usuari es troba en l'annex 2 del present PFC. Aquest manual va començar com un quadern d'anotacions i ha esdevingut un document de 150 pàgines amb gràfics i captures de pantalla on s'expliquen detalls en l'ús del software emprat.

4.1. Descripció del codi de càlcul RELAP5/MOD3.3

4.1.1. Introducció

Una de les conclusions de l'informe de la Comissió Kemeny (NUREG-0585, 1979; [2]), reunida per a analitzar l'accident de TMI-2 l'any 1979, fou millorar el coneixement tècnic de les plantes. I una de les maneres de millorar aquest coneixement fou potenciar l'ús de computadores per a analitzar amb detall els possibles escenaris. En aquest context, el Departament d'Energia dels Estats Units (DOE) decidí impulsar diferents codis informàtics de càlcul amb aquesta finalitat.

Els codis es desenvoluparan per a finalitats específiques i a mode d'exemple tenim RELAP5, TRAC-PF1, TRAC-BF1, RAMONA o PARCS. Dels diferents codis, en destaca la família de codis RELAP5. Els codis RELAP5 han estat desenvolupats per l'*Idaho National Engineering and Environmental Laboratory* (INEEL), amb l'impuls del DOE i la Comissió Reguladora Nuclear dels Estats Units (NRC).

La finalitat de RELAP5 és la de realitzar anàlisis termohidràuliques de les centrals nuclears, a fi i efecte de poder estudiar el comportament acoblat del reactor i el sistema de refrigeració, tant en estat estacionari com en diferents escenaris transitoris. Cal fer un petit incís que l'ús de RELAP5 es pot estendre a tot tipus de centrals tèrmiques. Dins de la família RELAP5, s'ha de destacar la utilització per part del GETH del codi RELAP5/MOD3.2, ja que aquesta versió ha estat usada per la realització de models de les CN d'Ascó i Vandellòs utilitzant anàlisis de fluxos i neutrònica unidimensionals. El GETH té molta experiència amb aquest codi i han estat molts els treballs presentats.



4.1.2. Característiques del codi RELAP5/MOD3.3

El codi es presenta com a un petit programa informàtic ja compilat. Aquest programa realitza els càlculs a partir del fitxer de text que conté el model a simular. Ocupa uns pocs MB.

RELAP5 resol, per a un sistema bifàsic aigua-vapor, les sis equacions de conservació: massa, energia i quantitat de moviment. El fitxer que conté el model rep el nom de fitxer d'entrada o *input*. RELAP5 realitza tots el càlculs de la simulació a partir de l'*input* i retorna dos fitxers diferents de sortida anomenats *output* i *restart*. És amb l'arxiu *restart* amb el qual es realitzen els gràfics pertinents per a la seva anàlisi. Tots els diferents arxius creats per RELAP5 són arxius de text i la seva interpretació no és gens trivial.

El fitxer *input* conté la descripció de la planta nuclear per a estudiar junt amb les condicions inicials de planta i les d'operació. Aquest fitxer normalment està estructurat en 5 seccions: hidrodinàmica, tèrmica, neutrònica, lògica i de control. Com s'ha comentat anteriorment, els fitxers *input* són arxius de text i per aquest motiu s'implementen amb qualsevol editor de text. Una de les dificultats en l'ús dels codis termohidràulics és precisament crear aquests fitxers. Els fitxers *input* tenen una estructura, organització i sintaxi pròpies i que fan que la seva creació sigui una tasca difícil, sobretot si es parteix de zero. El programa SNAP incorpora una interfície gràfica per a aquesta tasca facilitant-ne el procés.

4.2. Descripció del codi de càlcul TRACE

4.2.1. Introducció

Anteriorment s'ha comentat de l'existència de diferents codis termohidràulics amb característiques comunes i solapades per una banda i per altra amb característiques diferenciades i pròpies de cada codi. També es pot distingir entre els codis desenvolupats per la NRC i els que no ho són. Dels codis desenvolupats per la NRC s'hi troben els següents, amb cada tipus de situacions idònies d'aplicació:



Codi	Aplicació
RELAP5	LOCAs petits i transitoris operacionals.
TRAC-PF1	LOCAs grans.
TRAC-BF1	Anàlisi de seguretat de CNs tipus BWR.
RAMONA	Anàlisi de seguretat de CNs tipus BWR, cinètica 3D.
CONTAIN	Càlculs de contenció per a PWR i BWR.
PARCS	Neutrònica.

Taula 4.1. Codis de la NRC i els seus camps d'aplicació.

L'existència de diferents codis suposava una quantitat de temps, recursos i diners gastada en el desenvolupament, manteniment i millora molt gran. A més moltes funcions d'aquests codis se solapaven. Per aquests motius es va decidir l'any 1996 per part de la NRC de consolidar totes les diferents capacitats en un sol codi que pogués ser usat tant per a reactors PWR i BWR, optimitzant d'aquesta manera els recursos disponibles. Naixia així el codi termohidràulic consolidat.

La primera decisió presa per part de la NRC fou triar el punt de partida i aquest fou evolucionar, entre els diferents codis existents, el codi TRAC-PF1. A mida que s'anava evolucionant li foren incorporades característiques de TRAC-BF1 i RELAP5 i del primer nom TRAC-M s'ha passat a ser l'actual TRACE, acrònim de *TRAC/RELAP Advanced Computational Engine*. TRACE és el codi termohidràulic més significatiu de la NRC en l'actualitat.

4.2.2. Característiques del codi TRACE

El codi TRACE ha estat programat en Fortran90, com RELAP5. I la seva estructura és modular, és a dir, basada en objectes. El caràcter modular el fa fàcil de llegir i d'ampliar.

Com en el codi RELAP5, el codi de càlcul té la missió de resoldre un conjunt d'equacions diferencials: conservació de massa, energia i moment. A partir d'un arxiu d'entrada el codi fa els càlculs pertinents i retorna un conjunt de fitxers de sortida. Tant l'arxiu d'entrada com els de sortida són arxius de text. La seva sintaxi està construïda a partir de la del codi TRAC i és més



senzilla que la de RELAP5, però segueix sent complicada. El programa SNAP facilita la tasca de la implementació d'aquests fitxers.

Com tota simulació numèrica, un càlcul pot trigar un temps molt considerable en funció de la complexitat del model i TRACE no és una excepció. L'usuari pot aconseguir una simulació més ràpida sacrificant precisió en els càlculs.

Una de les principals diferències amb RELAP5 és que TRACE fa servir un reactor de geometria tridimensional, en oposició al reactor unidimensional de RELAP5. També porta una sèrie de components pre-implementats que en RELAP5 s'haurien d'implementar manualment. Un exemple d'aquest fet és l'element que representa el pressionador de les centrals PWR. En RELAP5 el pressionador es representa mitjançant un conjunt de canonades, mentre que en TRACE hi ha un element que per sí sol representa un pressionador.

TRACE permet acoblar-se amb el codi neutrònic de càlcul PARCS i de contenció CONTAIN per a realitzar simulacions molt complexes. No obstant, aquest tipus de simulacions queden fora de l'abast d'aquest PFC.

Aquest projecte ha vist l'evolució del codi ja que durant el seu desenvolupament van anar sortint noves actualitzacions. A l'inici la versió usada fou la v.4.160, i el cas pràctic fou implementat amb la versió v.5.0RC3. Altres versions intermitges foren alliberades pels seus desenvolupadors i foren testejades al GETH durant tot el període de temps que durà el projecte.

4.3. Descripció del programa SNAP

4.3.1. Introducció

SNAP és l'acrònim de *Symbolic Nuclear Analysis Package* i es tracta d'una GUI sota entorn Java dissenyada per a ser usada amb diferents codis termohidràulics, no només TRACE. El programa SNAP està sent desenvolupat per una empresa privada dels EEUU, sota els auspicis de la NRC.

SNAP actua com a editor i preprocessador dels diferents escenaris a simular i juntament amb el programa, que té la funció de postprocessador, faciliten la tasca de l'usuari. A SNAP se li pot incorporar un complement anomenat AptPlot i que és una eina per a construir gràfics. AptPlot ha estat creat a partir Xmgr, software per a la construcció de gràfiques sota llicència GPL molt usat en l'àmbit acadèmic. Es pot usar AptPlot sense necessitat d'usar-lo conjuntament amb SNAP.

Sent estrictes, l'ús de SNAP no és obligatori per a realitzar la simulació termohidràulica desitjada. No obstant, el seu ús fa innecessària l'execució del codi termohidràulic TRACE mitjançant línia de comandament, evitant així aquesta feixuga tasca i fent-la més intuïtiva. AptPlot facilita molt la



feina d'analitzar els resultats obtinguts perquè té la funció de llegir directament els diferents *outputs*, ja sigui tant en RELAP5 com en TRACE.

Una de les principals característiques de SNAP és que és un programa en entorn Java, i per tant multiplataforma. Encara que originalment han estat programats per a treballar sota Linux, el fet que siguin programes en Java fa que es pugui treballar amb ells sense cap problema sota Windows.

En aquest PFC s'han executat tant en Linux com en Windows. En l'apartat 5 es comenten les diferències entre els dos entorns de treball.

4.3.2. Característiques del programa SNAP

SNAP pot treballar amb diferents codis de càlcul i també permet acoblar-ne de diferents per a realitzar càlculs complexos. Cal destacar que SNAP no realitza càlculs en sí mateix. Aquesta tasca la realitza el codi de càlcul corresponent, SNAP facilita la comunicació entre l'*input* i el codi de càlcul. Per aquesta raó el seu ús no és imprescindible. No obstant, facilita la feina de l'usuari.

AptPlot per la seva banda porta incorporat una característica que li permet interpretar els resultats obtinguts amb diferents codis de càlcul. Això facilita molt la construcció de gràfiques per a l'anàlisi de resultats.

La funció principal de SNAP és la de crear els *inputs* corresponents. SNAP permet construir de manera gràfica el fitxer *input* que serà motiu d'anàlisi, tenint present quin codi de càlcul s'usarà en la posterior simulació. Enlloc de crear un fitxer de text de moltíssimes línies, l'usuari crea sobre la interfície gràfica el model de planta. Per a fer-ho es trien els elements corresponents continguts en el model i es van modificant els valors dels seus paràmetres. En molts d'aquests elements caldrà seleccionar el material corresponent i fins i tot es podrà fer servir materials nous només introduint els valors pertinents dels paràmetres en qüestió. De la unió de tots els components, s'acabarà tenint el model físic. A més a més introduint-hi els valors de les condicions inicials i les variables temporals de la simulació, s'acabarà de construir l'input del model per a ser simulat. La construcció dels *inputs* amb SNAP és anàloga a crear un model de simulació en Ansys, Comsol o altres aplicacions d'enginyeria.

En l'annex 2, que conté el manual d'usuari desenvolupat en aquest PFC, s'hi troben descripcions molt més detallades d'aquests programes, així com exemples d'ús.



4.4. El servidor remot de SNAP

SNAP té la característica que es poden configurar tants servidors remots com es vulgui. Aquests són màquines remotes a les quals es poden enviar els càlculs pertinents per tal que sigui aquesta màquina la que realitzi els càlculs, alliberant d'aquesta manera molts recursos de la màquina local. A mode d'exemple: un cop es tenim finalitzat el model, podem enviar els inputs a un *cluster* extern expressament dedicat a càlculs.

Com a part d'aquest PFC s'ha configurat un servidor remot en un dels ordinadors que actuen de servidor del Laboratori de Termohidràulica.



5. Implementació de les eines computacionals al Laboratori de Termohidràulica

El laboratori de Termohidràulica disposa d'equips amb processador Intel Core i entorns Windows XP i Linux, amb una antiguitat superior als 5 anys. Aquests equips han estat usats per a simulacions termohidràuliques en RELAP5, però no pas en TRACE.

El primer punt que es va observar fou que SNAP no és imprescindible per a ser usat amb el codi TRACE. El codi TRACE pot ser executat per si sol però cal tenir el fitxer input. Si no es té el fitxer input cal crear-lo com a fitxer de text seguint la sintaxi del codi de càlcul. El GETH porta anys treballant d'aquesta els models en RELAP. No obstant, amb el programa SNAP es poden crear els fitxers input sense necessitat de conèixer a fons tots els detalls del codi. Crear un model de simulació mitjançant SNAP consisteix a triar els diversos components del sistema, unir-los convenientment i introduir les condicions de contorn a mode de paràmetres. És una forma de treball anàloga als programes de simulació Ansys, OrCad, Comsol o Nastran, àmpliament usats avui dia tant a nivell acadèmic com industrial.

A causa de la més fàcil experiència d'usuari es decideix usar el codi TRACE en combinació del programa SNAP. Es va procedir a instal·lar els codis de càlcul TRACE i RELAP5, i el programa SNAP amb el complement AptPlot. Tot seguit es va configurar SNAP per a que pugui modelar sistemes en TRACE i RELAP. També es va configurar el servidor remot per a poder ser usat quan calgui. Es troben preparats per a ser usats.

5.1. Resum del procés de implementació

SNAP té l'avantatge que no depèn del sistema operatiu ja que està programat en Java, no obstant cal que l'ordinador tingui l'entorn Java instal·lat. Independentment de l'entorn de treball Windows o Linux, es pot resumir el procés de instal·lació en els següents passos:

1. Instal·lació de l'entorn Java, amb la llibreria addicional Java3D.
2. Instal·lació del programa SNAP.
3. Enllaçar els executables dels codis de càlcul RELAP5 i TRACE amb el programa SNAP.
4. Instal·lació del complement de SNAP AptPlot.
5. Configuració de SNAP.

5.2. Qualificació del software

Per tal de qualificar el software es van executar diversos inputs de RELAP de la biblioteca de casos del GETH mitjançant el programa SNAP i es va veure que els resultats obtinguts eren



idèntics. A l'hora de l'execució també es va crear el model de simulació RELAP corresponent. L'arxiu de model, a diferència de l'arxiu input és un arxiu que SNAP reconeix i retorna en pantalla un diagrama que representa el model de simulació. D'aquesta manera l'usuari té un arxiu en format gràfic del model, a diferència de treballar mitjançant línia de comandament on es té un arxiu purament de text.

D'altra banda, es van construir diversos models simples de sistemes termohidràulics senzills mitjançant el programa SNAP i creant l'input com a fitxer de text i important-lo i es va comprovar que el models de simulació era anàlegs.

En aquest punt es va fer servir una eina de SNAP que tradueix de codi RELAP a TRACE. Com s'ha comentat el GETH disposa d'àmplia en RELAP, llavors es tractava d'usar aquesta experiència en TRACE. Es va traduir directament diversos inputs i tot seguit es procedia a executar-los i comprovant que els resultats no divergissin. No sempre donava bons resultats i això va servir també per a aprendre a construir inputs de TRACE amb SNAP, i també mitjançant l'entrada manual de codi.

Així quedava qualificat el sistema de treball consistent en modelitzar gràficament en SNAP un model de simulació termohidràulica.

Durant aquesta fase es va poder comprovar la utilitat de SNAP com a postprocessador ja que permet realitzar gràfics temporals de les variables de sortida sense necessitat de fer una tria de les dades de l'output. No obstant, ni la seva GUI és gaire amigable ni el seu ús és gaire intuïtiu. Per aquest motiu es va decidir d'exportar a Excel ja que és un software àmpliament usat tant a nivell industrial com domèstic.

És d'esperar que futures versions de SNAP milloraran l'experiència d'usuari.

5.2.1. Avantatges i inconvenients

Ja s'ha comentat que SNAP permet construir els models de forma gràfica manipulant els valors dels paràmetres dels blocs que formen el sistema. Aquesta manera de treballar és la que ens trobem en el software comercial de simulació i a priori simplifica molt la tasca de modelització ja que es té en tot moment una idea visual del sistema. Creant el model per medi del fitxer de text no tindríem aquesta visualització.

No obstant, el que d'entrada és una avantatge, és alhora un inconvenient. I la raó és la amicitat de la interfície gràfica. En la versió usada de SNAP, l'ajuda del programa no està ben implementada dins dels diversos elements bloc del sistema. Posem un exemple: quan l'usuari té dubtes en el paràmetre C del bloc 20 del model ha d'anar al manual del TRACE [3], enlloc d'obrir



la finestra d'ajuda de l'element que conforma el bloc 20. Aquesta qüestió es pot explicar per l'evolució del software i és d'esperar que en properes versions de SNAP la funció d'ajuda sigui millorada i ampliada.

Si l'usuari té amplis coneixements del codi, pot canviar els paràmetres anant directament a la línia de codi i no té necessitat de clicar sobre el bloc corresponent, esperar que s'obri la seva finestra i clicar sobre el paràmetre en qüestió per a canviar-li el valor. En canvi per a afegir un element dins el model és més fàcil afegir-lo gràficament per medi de SNAP que no pas editant el fitxer input. A més SNAP al ser gràfic permet visualitzar els elements adjacents i així facilitar la construcció de les unions entre elements.

Per tot això es pot dir que si l'usuari té pocs coneixements del codi de càlcul, SNAP li és de gran utilitat. En canvi, si l'usuari té amplis coneixements de codi, SNAP li serveix de complement.

5.2.2. Dificultats trobades durant la implementació i qualificació del software

Durant les fases d'implementació i familiarització del software la major dificultat enfrontada fou el caràcter beta de les versions del software, ja fos TRACE com SNAP. Aquesta problemàtica és habitual avui dia a causa del cicle de vida del software.

A l'inici del projecte la versió de TRACE usada era la v.4.160. I no coordinava bé amb SNAP quan es treballava en Windows, el que provocava que el sistema es quedava en plena simulació, provocant la desesperació de l'usuari. Per aquest motiu es va decidir prioritzar l'ús en Linux, almenys en el període inicial. La darrera versió usada fou la v.5.0RC3 i presentava una estabilitat molt millorada.

En pocs mesos es van rebre diverses actualitzacions tant de TRACE com de SNAP. I val a dir que les versions usades durant el cas pràctic eren prou robustes.

Un altre punt que es va trobar fou el fet que les simulacions de TRACE funcionaven millor en Linux que en Windows. La diferència era de pocs segons en simulacions de sistemes no gaire complexos que trigaven menys de dues hores. Si s'extrapolés a simulacions de models integrals de centrals nuclears que poden trigar nits senceres o fins i tot dies a ser completades, la diferència seria d'alguns minuts. De manera anàloga, si es feia servir el servidor remot per a l'execució de les simulacions aquesta diferència seria molt significativa. Per aquest motiu es va recomanar de treballar en Linux sempre que fos possible.



5.3. Recomanacions de treball

Es van extreure algunes recomanacions de treball a partir de les fases d'aprenentatge i qualificació del software.

De la part de familiarització i implementació es recomana treballar en Linux enfront de Windows per un motiu d'estabilitat.

De la part de qualificació se suggereix usar SNAP com a preprocessador per a construir els models, sabent les limitacions existents; i es recomana fortament el seu ús com a preprocessador ja que facilita la feina.

La corba d'aprenentatge de qualsevol codi termohidràulic, i de TRACE en particular, es molt lenta. I aquesta es pot accelerar si s'acompanya de SNAP.

Tot i la amicitat de SNAP a l'hora de modelitzar, la versió usada mostrava problemes d'estabilitat (sobretot en entorn Windows) a l'hora d'executar les simulacions. Per aquest motiu es prefereix executar les simulacions per línia de comandament enfront de SNAP. I per això mateix es van crear scripts d'execució mitjançant l'editor vi.

La darrera recomanació de treball és seguir el desenvolupament tant de SNAP com de TRACE perquè la interfície gràfica ha de millorar, fent-lo més robust i estable. A més es preveu que la versió en Windows esdevingui molt més estable.



6. Cas pràctic

Com a prova de la validesa de les eines descrites es va procedir a implementar un model de planta en codi TRACE i a la posterior execució d'un transitori de planta. Aquest cas ha estat publicat a la web de la NRC i es troba a lliure disposició. És el tema central del document *Development of a Vandellòs II NPP Model using the TRACE Code: Application to an Actual Transient of Main Coolant Pumps Trip and Start-up (NUREG/IA-0243)* [7] del qual són autors principals Olga Lozano i Cheng-Ping Chiang. La preparació del model fou un treball conjunt mentre que l'execució del cas fou realitzada per Cheng-Ping Chiang.

6.1. Descripció del cas

El cas pràctic consisteix en la creació d'un model en TRACE de la CN Vandellòs II, amb l'execució d'un transitori. El transitori escollit fou un transitori real en les bombes principals que va tenir lloc el dia 24 d'agost de 1993, del qual es té el conjunt complet de dades registrades. Es va triar aquest transitori perquè es disposava de tota la informació completa i perquè s'havia desenvolupat una simulació en RELAP5.

6.1.1. Modelització

El punt de partida per a la modelització de la planta de Vandellòs fou el model en RELAP5 d'aquesta mateixa central. Aquest és un model desenvolupat i validat pel GETH i amb àmplia experiència acumulada.

El model que s'ha construït en TRACE inclou els següents elements:

- Reactor, amb geometria tridimensional.
- 3 Llaços del primari, amb els corresponents generadors de vapor.
- Pressionador
- Bombes del primari.
- Sistemes de control.

I s'ha construït seguint la nodalització emprada en el model en RELAP per tal de mantenir l'analogia, sempre que ha estat possible. A mode d'exemple: si en el model en RELAP la bomba del primari del llaç 1 de refrigeració s'identifica com l'element 260, en el model en TRACE també té aquest mateix identificador.

En els casos que no ha estat així s'han algunes modificacions dels valors de diferents paràmetres. El paràmetre que ha patit més variacions són les alçades relatives dels elements canonada i ha estat per a tancar tot el llaç de refrigeració de la central.



No s'han inclòs els elements de neutrònica ni tampoc els components del sistema secundari. La diferència principal respecte el model en RELAP és la geometria tridimensional del reactor en el model en TRACE.

A diferència de RELAP on el reactor es representa per mitjà d'un element unidimensional, anàleg a un fil amb generació de potència, en TRACE es representa per un element tridimensional; en concret de geometria cilíndrica amb 3 divisions azimuthals, un per a cada llaç de refrigeració.

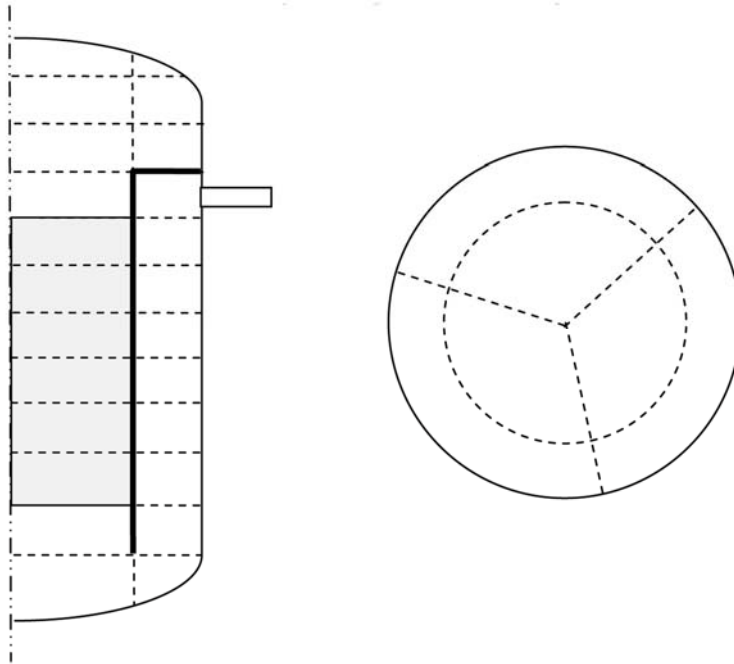


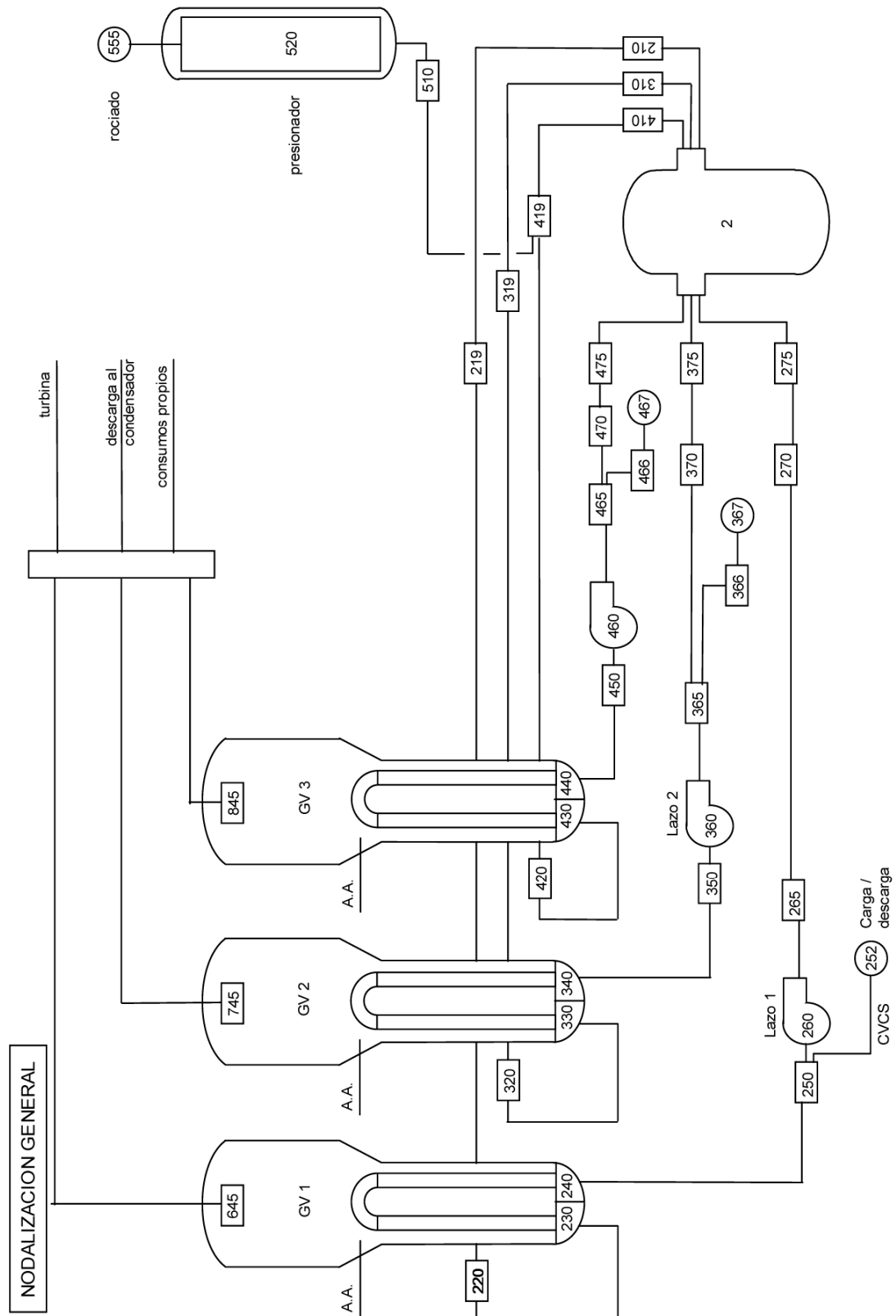
Fig. 6.1. Geometria tridimensional del reactor

El model inclou els següents elements de control:

- Nivell i pressió del pressionador.
- Nivell i flux màssic dels GV.
- Control turbina.
- Alleujament secundari.
- Steam-dump .

Per a la construcció del model s'usa el mode gràfic de SNAP i donà lloc a un fitxer input i un altre mod de l'ordre de centenars de kB.





C.N. VANDELLÓS II

Fig. 6.2. Nodalització de la CN Vandellòs II



6.1.2. Descripció del transitori

El transitori analitzat fou un cas real que va tenir lloc a la CN Vandellós II el dia 24 d'agost de 1993 quan una pèrdua momentània de potència offsite provocà l'aturada de les bombes de refrigeració principals del reactor (RCP) i la posterior aturada del reactor i la turbina. El sistema anà a parada calenta i es va procedir a la re-arrencada seqüencial de les bombes.

Es disposen dades completes del sistema d'adquisició de dades de Vandellós II entre les 16:15h i les 17:30h. En aquests 4500 segons els primers 618 es corresponen a l'estat anterior a la pèrdua de potència i el succés iniciador del transitori té lloc als 620 segons amb l'aturada de les bombes principals. Els principals fets es recullen a la taula 6.1.

S'han introduït 3 variables per tal de representar la parada de les RCP als 620 segons.

Es realitza la simulació en TRACE mitjançant un càlcul transitori de 4500 segons de durada, els mateixos dels quals es disposen dades.

Temps (s)	Fet destacable
0	Inici de dades; 16:15h
618	Pèrdua momentània de potencia offsite; 16:25h18s
620	Aturada RCP
620	Aturada turbina i reactor
635	Control manual del sistema d'alimentació d'aigua auxiliar
1522	Re-arrencada del RCP C, corresponent al llaç 3
2320	Aïllament del sistema principal
2584	Re-arrencada del RCP B, corresponent al llaç 2
4500	Fi d'enregistrament de dades

Taula 6.1. Principals fets del transitori de bombes analitzat.

6.2. Resultats obtinguts i comentaris

El resultats en brut de la simulació van sortir en un fitxer output de més de 20 mil línies de codi, per al seu posterior anàlisi. L'ús de SNAP va facilitar molt aquesta tasca. Els resultats obtinguts es resumeixen a la taula 6.2, comparant-los amb els valors de la planta.



Paràmetre	Valor planta	Valor simulació TRACE
Potència nuclear (%)	100.56	99.43
Temp. branca calenta 1 (K)	598.55	603.04
Temp. branca calenta 2 (K)	598.12	602.33
Temp. branca calenta 3 (K)	599.29	602.39
Temp. mitjana llaç 1 (K)	581.92	585.22
Temp. mitjana llaç 2 (K)	581.29	584.75
Temp. mitjana llaç 3 (K)	581.85	584.86
Temp. branca freda 1 (K)	565.29	567.41
Temp. branca freda 2 (K)	564.46	567.16
Temp. branca freda 3 (K)	564.40	567.32
Pressió pressorador (kPa)	15518.26	15513.50
Nivell pressorador (%)	59.10	59.97
Pressió GV 1 (kPa)	6747.78	6770.45
Pressió GV 1 (kPa)	6726.34	6742.43
Pressió GV 1 (kPa)	6949.33	6745.42
Nivell GV 1 (%)	51.10	50.00
Nivell GV 2 (%)	49.79	50.00
Nivell GV 3 (%)	49.37	50.00
Flux vapor 1 (kg/s)	521.21	514.13
Flux vapor 2 (kg/s)	526.54	512.49
Flux vapor 3 (kg/s)	535.04	505.54

Taula 6.2. Comparativa entre els valors de la planta i els valors obtinguts en la simulació. Font: [7]



De la taula 6.1, es pot comprovar que la diferència relativa entre els valors reals i els obtinguts en la simulació són petits.

Els paràmetres més significatius són la temperatura i els caudals del primari, els nivells tant del pressonador com dels GV i les pressions dels GV. I es presenten les gràfiques a continuació.

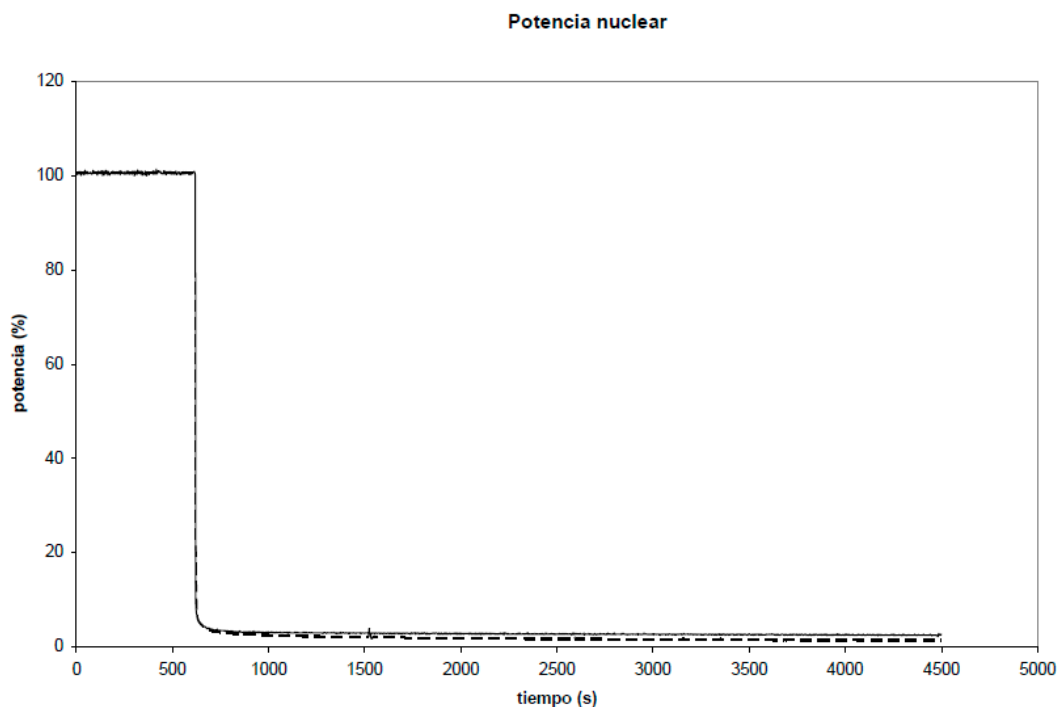


Fig. 6.1. Valors reals de potència nuclear enfront als valors de la simulació en TRACE. Font: [7]

La figura 6.1 compara mostra els valors reals de potència nuclear amb els valors obtinguts en el model de simulació en TRACE. I es pot comprovar la convergència entre els valors reals de planta i els valor de la simulació en TRACE.

La figura 6.2 mostra la temperatura del primari. S'aprecia clarament la caiguda de temperatura deguda a l'aturada que inicia tot el transitori. I també es pot veure una discrepància. No obstant, aquesta discrepància té una explicació i és deguda al sistema de recollida de dades de la planta real basada en termoparells. Mentre que en la simulació és calculada. Els termoparells no reflecteixen la temperatura real quan no hi ha convecció forçada. Quan la convecció forçada es recupera els valors de temperatura convergeixen. Aquest fet és conegut i també apareix en el model RELAP.



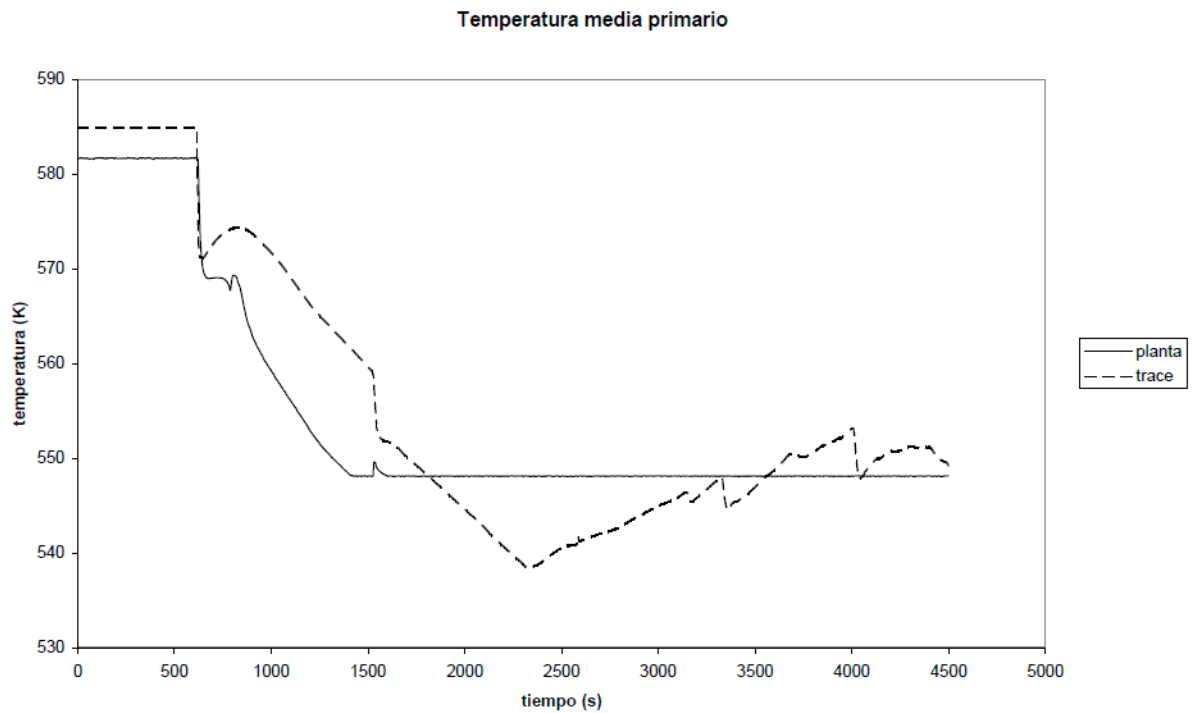


Fig. 6.2. Comparativa entre temperatures del primari. Font: [7]

En paral·lel a la temperatura del primari es mostra el nivell del pressionador en la figura 6.3.

En aquesta figura es veu com l'evolució dels valors obtinguts per simulació segueix el mateix patró que els valors reals. Es veu la caiguda del nivell deguda a l'aturada i la recuperació del seu valor. Tot això implica que els valors del pressionador són correctes.

A més com els valors del pressionador estan correlacionats amb les temperatures del primari, les temperatures obtingudes per simulació són correctes.



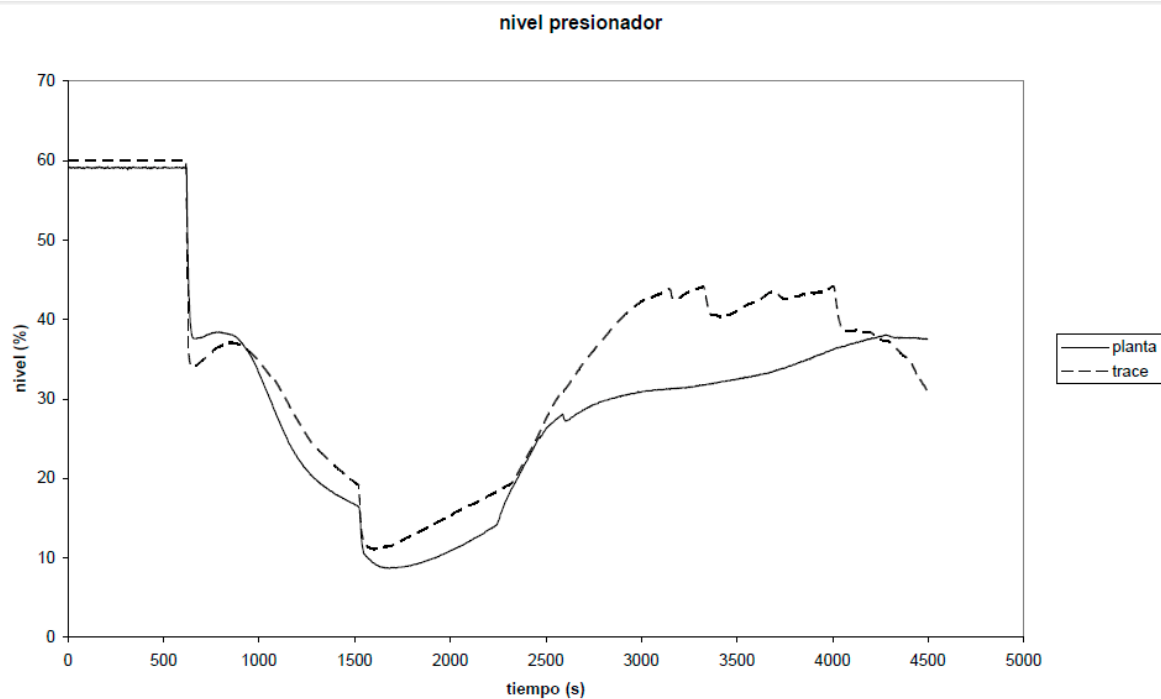


Fig. 6.3. Comparativa entre els nivells del pressionador. Font: [7]

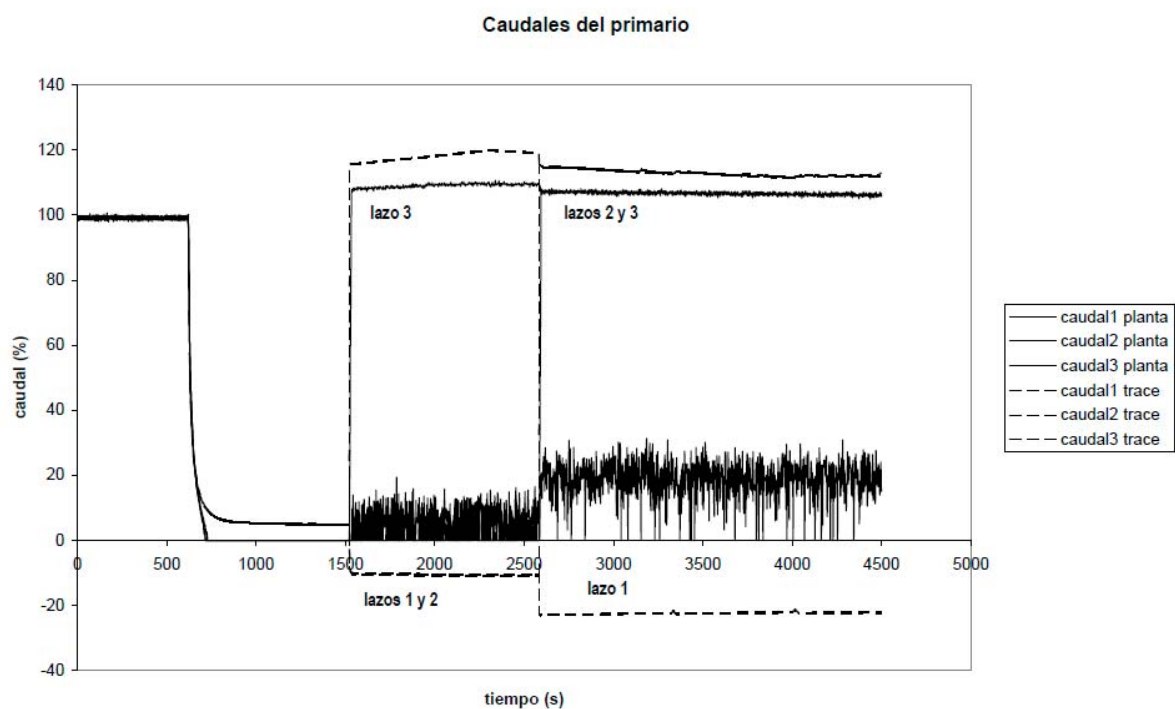


Fig. 6.4. Comparativa entre els caudals del primari. Font: [7]



L'evolució del caudal del primari es mostra a la figura 6.4. S'aprecia que hi ha moltes oscil·lacions als valors de planta mentre que als valors de TRACE presenten una pauta uniforme. Aquest fet és degut al sistema de mesura de la planta, de forma anàloga a la temperatura del primari. Per aquest motiu en els valors de planta mai hi ha valors negatius, mentre que sí es troben en els simulats. Es pot afirmar que els valors simulats són significativament semblants als valors reals.

En quant als nivells i pressions dels GV, aquestes es mostren a les figures 6.5 i 6.6.

La figura 6.5 mostra el nivell en tant per cent al GV1. I es comprova la convergència entre els valors reals i els simulats en TRACE. Cal fer un petit incís en que en la simulació es pot veure una zona petita on els valors de TRACE són negatius. Aquest fet és degut al sistema de recollida de dades de la planta que no mesura valors negatius.

La figura 6.6 mostra la pressió al GV3 i també és pot comprovar la convergència entre els valors obtinguts i els reals.

Els nivells als GV2 i 3, i les pressions als GV1 i 2 es troben en l'annex 1 i mostren de la mateixa forma la convergència entre els valors reals i els calculats.

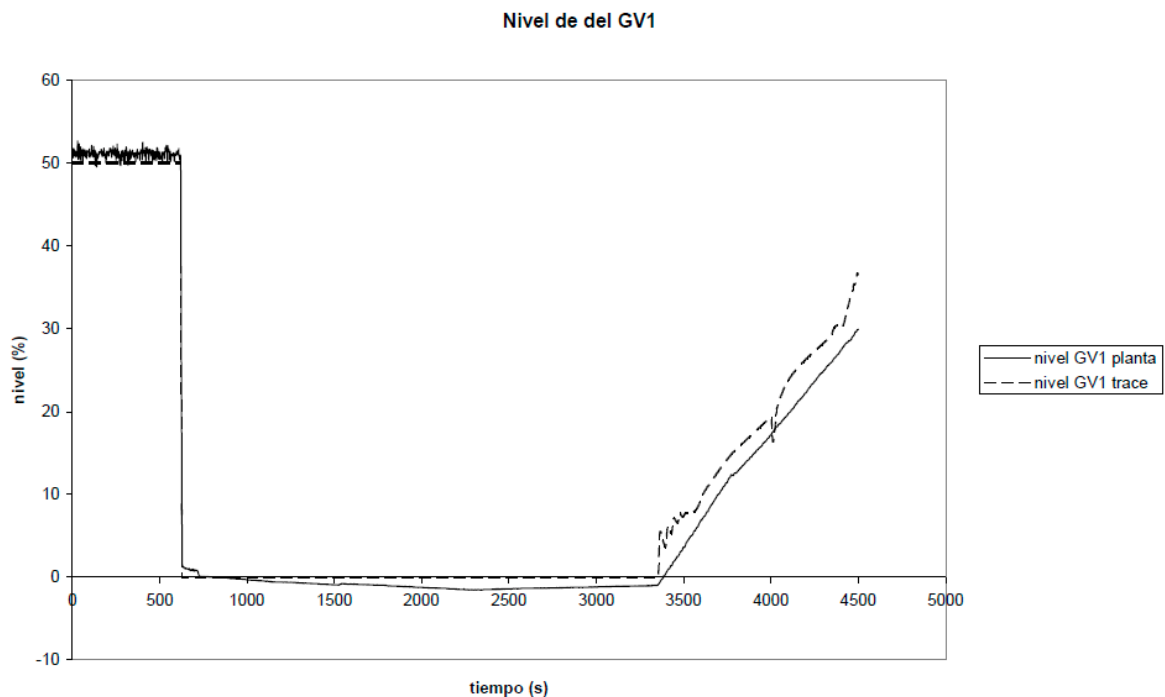


Fig. 6.5. Comparativa entre els nivells al GV1. Font: [7]



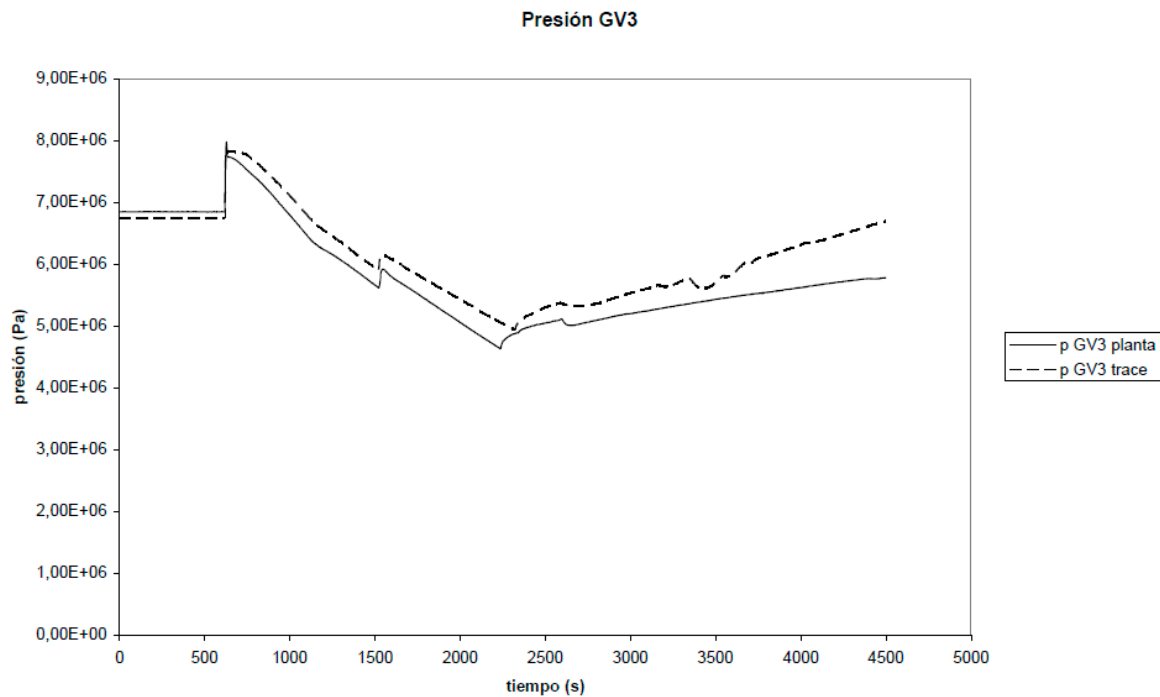


Fig. 6.6. Comparativa entre les pressions del GV3. Font: [7]

La geometria tridimensional del reactor s'analitza mitjançant el flux azimuthal al downcomer i aquest mostra consistència amb les dades disponibles.

Es pot concloure que els valors de pressions, nivells dels GV i temperatures mitjanes del primari concorden amb els valors del sistema d'adquisició de dades de Vandellòs II. Aquesta similitud prova la validesa del model desenvolupat.

Els resultats obtinguts validen i qualifiquen el model en TRACE de la CN Vandellòs II.

Els resultats complets d'aquest treball han esdevingut una publicació de la NRC i es troben a disposició de la comunitat científica a la web d'aquest organisme. Dins els annexos d'aquest projecte, en concret en l'annex 1, es troba una còpia d'aquesta publicació.



6.3. Desenvolupaments posteriors

El model de planta desenvolupat durant el cas pràctic ha estat tant el primer model construït com el primer cas simulat en codi TRACE pel GETH. És previsible que el GETH realitzi més treballs en TRACE perquè la NRC el presenta com el seu software més representatiu en l'actualitat.

Ha estat el punt de partida de posteriors casos analitzats pel GETH. Dintre d'aquests casos es troben els treballs d'Emili Martinez [12] on es desenvolupa un model en TRACE de la CN Ascó, Rubén Pereira en el qual implementa un model de cinètica puntual [13], o de Raimon Pericas [14] on en la seva tesi doctoral va realitzar càlculs acoplats en TRACE i PARCS amb la metodologia de best estimate.

En futurs treballs del GETH es podran simular nous transitoris i aprofundiran la característica de TRACE del vas tridimensional del reactor per a obtenir càlculs més precisos.





7. Pressupost

El fet de ser aquest un projecte de simulació, la infraestructura usada es limita al material d'oficina i al software necessaris per a les tasques de modelització i simulació.

El cost material inclou els fungibles i les impressions usats durant el període d'un any de realització del projecte. Amb anterioritat s'ha comentat que els equips informàtics usats tenen un antiguitat superior a 5 anys i per això es consideren totalment amortitzats. També s'ha comentat que el software usat és distribuït de forma gratuïta a la comunitat d'usuaris. La següent taula resumeix el cost material.

Concepte	Preu unitari (€)	Unitats	Preu total (€)
Material fungible	30	1	30
Impressions	200	1	200

Taula 7.1. Conceptes de material

En quant a mà d'obra, s'inclouen hores d'enginyer sènior corresponents a les hores sota supervisió del tutor i d'enginyer junior.

Concepte	Preu unitari (€/h)	Unitats (h)	Preu total (€)
Enginyer junior	24	960	23040
Enginyer sènior	60	24	1440

Taula 7.2. Conceptes de mà d'obra

El cost agregat inclou tant el cost de mà d'obra com el cost material. S'ha inclòs un tipus d'IVA del 18% perquè era el tipus vigent l'any 2009 quan es va realitzar el projecte.



Tot seguit es detalla el cost agregat del projecte:

Concepte	Preu (€)
Material fungible	30
Impressions	200
Hores enginyer junior	23040
Hores enginyer sènior	1440
Subtotal	24800
IVA 18%	4464
TOTAL	29264 €

Taula 7.3. Pressupost agregat



8. Estudi d'impacte ambiental

El fet de ser aquest un projecte de simulació, realitzar un anàlisi de l'impacte causat per aquest projecte al medi no és directa perquè les aplicacions a les quals es poden associar els resultats del projecte poden ser molt diverses.

De tota manera, cal considerar l'impacte ambiental específic de la realització d'aquest projecte. Per realitzar-lo ha estat indispensable la utilització d'ordinadors i material d'oficina, amb la despesa energètica i de materials que això comporta.

La despesa energètica es pot aproximar com el nombre d'hores d'utilització computacional. El PC usat té una font d'alimentació de 250 W i el nombre d'hores és de 960 h, tal com es detalla en l'annex 2.

$$E = 250W \cdot 960h = 240000Wh = 240kWh$$

Es pot veure que la despesa energètica ha estat similar a l'electricitat gastada durant un mes per una unitat familiar de dues persones.

La despesa de materials es limita a les impressions i al material d'escriptura usat. Per a minimitzar aquesta despesa s'han aplicat mesures de gestió de residus:

- Limitar al màxim la quantitat de paper imprès i usant sempre que fos possible la impressió a doble cara i multipàgina.
- Usant paper de borrador.
- Reciclant paper i tinta d'impressora.

Per altra banda el fet de realitzar la simulació comporta tot un estalvi de materials, energia i recursos enfront a reproduir el cas físic de transitori de bombes en la central nuclear. Una possibilitat de reproduir el cas simulat seria repetint el succés en la planta física real. Aquesta possibilitat té un impacte molt alt doncs caldria interrompre el normal funcionament de la planta i els diferents components patirien un desgast a acumular al seu temps de vida. Addicionalment tindria un cost econòmic i social molt important. L'impacte econòmic seria perquè la planta real romandria desconnectada de la xarxa elèctrica i socialment també tindria un impacte ja que seria un succés notificable a la CSN, amb la corresponent repercussió als mitjans de comunicació. Com reproduir físicament el succés en la planta real no és una opció viable, una altra possibilitat seria reproduir el succés en una planta experimental. Aquesta però, també té un impacte alt de recursos materials, energètics i humans.



En conseqüència, la simulació computacional és molt més efectiva no només per a reproduir successos passats sinó també per a predir el comportament de nous successos que no s'han arribat a reproduir. La prova de tot això és que són àmpliament usats no només en l'enginyeria nuclear sinó en tots els camps de l'enginyeria.



Conclusions

Les simulacions termohidràuliques són una eina bàsica en l'anàlisi de seguretat nuclear, i el codi TRACE és una eina bàsica en aquest camp. A més l'ús simultani de TRACE i SNAP fa més intuïtiva i amigable la tasca de modelització.

Aquest projecte introdueix l'ús del codi TRACE i el software SNAP dins el Grup d'Estudis Termohidràulics. La corba d'aprenentatge de qualsevol codi termohidràulic, i de TRACE en particular, és molt lenta. I aquesta es pot accelerar si s'acompanya de SNAP. A més, el manual d'usuari que s'ha creat servirà pel futur.

S'ha realitzat un procés d'aprenentatge d'aquest codi no usat amb anterioritat i s'ha transmès els coneixements adquirits per a la realització del cas pràctic.

S'ha construït un model de la CN Vandellós II en codi TRACE per a simulacions termohidràuliques, partint de l'experiència acumulada en RELAP. Aquest model conté la característica de la cuba tridimensional del reactor.

Amb el model construït s'ha realitzat un cas pràctic de simulació termohidràulica. El cas pràctic desenvolupat qualifica i valida totalment el codi TRACE com a eina d'anàlisi termohidràulica. En posteriors casos es podrà treure profit de la característica de la geometria tridimensional del reactor per a obtenir càlculs més precisos en nous casos pràctics.

Un punt altra punt de futur treball és que TRACE, a diferència de RELAP, també permet la modelització de CN tipus BWR. Aquest és un altre camí de treball futur que obre el present projecte.

Finalment, destacar que el cas pràctic realitzat ha comportat la seva publicació per part de la NRC.





Annex 1: NUREG IA-0243

Aquest PFC ha comportat la publicació resultant del cas pràctic executat. Aquest ha estat publicat per la NRC sota el codi NUREG IA-0243.

Dins la carpeta annexos es troba una còpia d'aquesta publicació.

També es pot trobar a la web de la NRC:

<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/agreement/ia0243/>





Annex 2: Manual d'usuari

Durant la 1a i 2a etapes del projecte es va anar recollint l'experiència adquirida en un petit manual d'usuari per a ús intern del GETH. El que va començar com un quadern d'anotacions ha esdevingut un document de més de 150 pàgines amb gràfics explicatius dels diversos processos associats a l'ús de SNAP i TRACE. És un document fet en Word, d'accés lliure i obert i que resta obert a ser modificat a causa de noves versions del software (i dels entorns de treball) i a través de l'experiència que els diferents usuaris del GETH vagin adquirint.

Aquest manual s'ha realitzat en català. Pel futur es deixa obert a traduir-lo a l'anglès o altres idiomes.

El manual descriu de forma gràfica els passos per a la instal·lació del software SNAP i TRACE, així com d'alguns complements que en el moment de la realització del projecte no s'inclouen dins de TRACE. Versions posteriors han anat incorporant aquests complements. També posa èmfasi en els diferents tipus de fitxers usats, un punt clau per a la correcta utilització de TRACE.

L'annex 2 porta una còpia del manual d'usuari.





Agraïments

Als meus pares i a la meva germana per tota la santa paciència.

Al professor Francesc Reventós, el meu director de projecte, pel temps dedicat.

A la família del Grup d'Estudis Termohidràulics.

Al Dr. Patrici Molinàs per les seves lliçons de l'editor vi.

Al professor Manuel Sevilla i al mestre de taller Miguel Carreras, els savis bojos de la -1, pels bons consells en els moments difícils al llarg d'aquests anys.





Bibliografia

- [1] NRC. *NUREG-1150: Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants*. US NRC, 1991.
- [2] NRC. *NUREG-0585: TMI-2 Lessons Learned Task Force Final Report*. US NRC, 1979
- [3] NRC. *TRACE v5.0 Theory Manual*. US NRC 2008.
- [4] NRC. *TRACE v5.0 User's Manual volume 1*. US NRC 2008.
- [5] NRC. *TRACE v5.0 User's Manual volume 2*. US NRC 2008.
- [6] KNIEF, R. *Nuclear Engineering. Theory and Technology of Commercial Nuclear Power*. Taylor and Francis, 1992.
- [7] LOZANO, O.; CHIANG, C-P.; LLOPIS, C.; BATET, L.; REVENTOS, F. *Development of a Vandellòs II NPP Model using the TRACE Code: Application to an Actual Transient of Main Coolant Pumps Trip and Start-up (NUREG/IA-0243)*. US NRC, 2011
- [8] LAMB, L. *Learning the vi editor*. O'Reilly, 1998.
- [9] THOMAS, K. *Begining SUSE Linux*. Apress, 2006.
- [10] AADD. *SUSE Linux 10 Bible*. Wiley, 2006.
- [11] AADD. *Linux Bible 2007 edition*. Wiley, 2007.
- [12] MARTINEZ, E. *Desenvolupament d'un model termohidràulic de la CN Ascó amb el codi TRACE*. PFC. UPC, 2011.
- [13] PEREIRA, R. *Desarrollo e implementación de un modelo de cinética puntual mediante el código TRACE*. PFC. UPC, 2013.
- [14] PERICAS, R. *Contribution to the validation of best estimate plus uncertainties coupled codes for the analysis of NK-TH nuclear transients*. Tesi doctoral. UPC, 2015.

